

# 强夯法在加固填海地基工程中的应用

彭满华 张海顺 唐祥达

(中船勘察设计研究院有限公司,上海 200063)

**【摘要】** 阐述了强夯法在某工程中的实际应用,通过采用多种检测方法,证明强夯法是处理开山碎石回填土地基的一种比较理想的方法。同时,通过在工程实际应用中所出现的问题,提出在强夯施工过程中应采用信息化施工方法。

**【关键词】** 强夯法;应用;信息化施工

**【中图分类号】** TU 472.3

**【文献标识码】** B

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.03.012

## Application of Dynamical Compaction Method

### Treating Detritus Filled Ground

Peng Manhua Zhang Haishun Tang Xiangda

(China Shipbuilding Industry Institute of Engineering Investigation & Design Co. Ltd, Shanghai 200063)

**【Abstract】** The dynamical compaction method treating filled ground is expounded. Dynamical compaction method is proved an effective method to treat detritus filled ground through many tests. At the same time, it is suggested that communication construction method be introduced during dynamical compaction construction.

**【Key words】** dynamical compaction method; application; communication construction

## 0 引言

强夯法是反复将质量为10~40 t的夯锤提到一定高度使其自由落下,落距一般为10~40 m,给地基以冲击和振动能量,使土体结构被破坏,孔隙被压缩,从而提高承载能力,并降低其压缩性,同时还可提高土层的均匀程度,减少将来可能出现的差异沉降。由于其具有施工简单、加固效果好、使用经济、适用土类广等优点,因而被世界各国工程界所重视。本文将介绍其在加固填海地基中的应用。<sup>[1-4]</sup>

## 1 工程概况及地质条件

### 1.1 工程概况

该工程为在某修船基地内建坞修机电综合车间、船体及管子车间、化学清洗及坞修设备间各一座及一栋3层生活办公楼和一座4~7层修船分厂办公楼。场地为近期开山碎石回填海滩造陆,回填方式为一次性巨厚层回填,现南部约2/3已回填,回填土以石渣角砾为主,夹少量50~100 kg的块石。设计采用强夯地基处理工艺加固填土层。

### 1.2 工程地质条件

根据勘察资料,场地地层情况如下所述。

第①层碎石填土层:灰黄色,黄褐色,松散一稍密状,碎石填土以粒径<30 cm的石渣、角砾为主,夹少量50~100 kg块石。层顶标高为5.52~4.69 m,层厚为3.40~11.6 m,平均厚8.17 m。透水性好,与海水有明显的水力联系。该层土土性极不均匀,动力触探击数最大为89击,最少仅1击,平均6.7击。表层密度为0.75~0.90,平均为0.81。

第②层淤泥质粉质粘土层:灰黄一灰色,流塑一软塑状态,主要成份以淤泥质粉质粘土为主,含贝壳碎屑及腐植质,包含粉细砂、粉土团、粘土团。局部分布,厚度薄,层顶标高为-2.80~-7.60 m,厚度0.20~1.10 m,平均厚0.64 m。其含水量为44.75%,压缩系数为0.989 MPa<sup>-1</sup>,压缩模量为2.51 MPa,固结快剪粘聚力为11.5 kPa,内摩擦角为8.74°,锥沉量为13.15 mm,比贯入阻力为0.224 MPa。

第⑦<sub>1</sub>层强风化花岗岩:肉红色,致密,岩石风化强烈,中粗粒花岗岩结构,块状构造,主要矿物为长石、石英、云母,节理裂隙发育,岩石风化强烈,岩体风化程度不均一,受节理裂隙发育状况影响,局部呈风化漏斗状,层面埋深3.40~13.50 m,层顶标高为-6.40~1.31 m。标贯击数大于50击,地基承载

力特征值  $f_{ak}=1000\text{ kPa}$ , 变形模量  $E_0=45\text{ MPa}$ 。

第⑦<sub>2</sub>层中风化花岗岩:肉红色,致密,岩石风化中等强烈,中粗粒花岗岩结构,块状构造,主要矿物为长石、石英、云母,节理裂隙发育。岩石饱和单轴抗压强度为  $37.9\sim 46.6\text{ MPa}$ ,地基承载力特征值  $f_{ak}=2500\text{ kPa}$ ,变形模量  $E_0=60\text{ MPa}$ 。

### 2 设计要求

由于场地内第①层碎石填土层厚度变化较大,为  $3.40\sim 11.6\text{ m}$ ,因此,设计根据碎石填土层厚度是否大于  $5\text{ m}$  将其分为两个区,分别采用  $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$  和  $6000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级进行强夯处理。

设计要求如下:

强夯分三遍进行,第一、二遍为点夯,  $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$  和  $6000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级的夯点间距分别为  $5.0\text{ m}$  和  $7.0\text{ m}$ ,呈正方形布置,夯点夯击次数分别不少于  $8$  次和  $16$  次;夯点的收锤标准以最后两击的平均夯沉量分别小于  $5\text{ cm}$  和  $8\text{ cm}$  控制。最后为  $1000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级满夯一遍。每夯点夯击  $2$  击,要求夯锤底面积彼此搭接  $1/3$ 。

不论是采用  $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级还是  $6000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级进行强夯,设计要求加固后的地基承载力特征值  $f_a\geq 220\text{ kPa}$ ,变形模量  $E_0\geq 20\text{ MPa}$ ,最终沉降量  $\leq 120\text{ mm}$ ,  $9\text{ m}$  柱距相邻柱子的沉降差  $\leq 30\text{ mm}$ 。

### 3 强夯法施工

强夯采用波兰产  $20\text{ t}$  起重机和杭州产履带式  $50\text{ t}$  起重机加龙门架提升夯锤至预定高度采用自动脱钩装置脱钩后锤自由落下夯击地基土,以达到场区的整

体稳定挤淤,提高地基的强度,减少地基的沉降量。  
 $6000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯区使用  $35$  吨锤,落距为  $17.2\text{ m}$ ;  
 $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯区使用  $18$  吨锤,落距为  $11.2\text{ m}$ 。

施工顺序为:回填场地平整→施工第一遍夯点第一个点→吊锤→自动脱钩夯锤下落→测量夯锤顶面标高→当夯坑深度达到锤高  $1.5$  倍时回填夯坑→平整场地→吊锤→自动脱钩夯锤下落→测量夯锤顶面标高(同上反复进行)→当最后两击的平均夯沉量小于  $5\text{ cm}$  ( $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯区)或  $8\text{ cm}$  ( $6000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯区)停止夯击→施工第一遍夯点第  $2$  个点→吊锤→自动脱钩夯锤下落……

由于场地回填土主要为碎石土,试夯检测孔隙水压力可在  $1\sim 2\text{ h}$  内消散,因此两遍点夯之间的间歇时间取为  $1\text{ d}$ 。

施工第二遍点夯时的顺序同第一遍,在施工完二遍点夯后,将场地夯坑平整,最后进行满夯。

### 4 强夯加固地基检测

在强夯施工完成后  $7\text{ d}$ ,采用了“双倍地基承载力特征值”的静载荷试验、全覆盖性的“瑞利波”检测、动力触探试验对强夯加固地基进行了检测。

#### 4.1 静载荷试验

采用慢速加荷沉降相对稳定法,加荷装置为面积为  $1.4634\text{ m}^2$ ,载荷板直径为  $1.365\text{ m}$  的圆形载荷板和  $100\text{ t}$  专用油压千斤顶,反力装置为  $60\text{ t}$  盛水水箱和钢梁形成堆载反力平台,沉降量测装置采用量程为  $50\text{ mm}$  的千分表和观测梁。

静载试验结果见图 1。

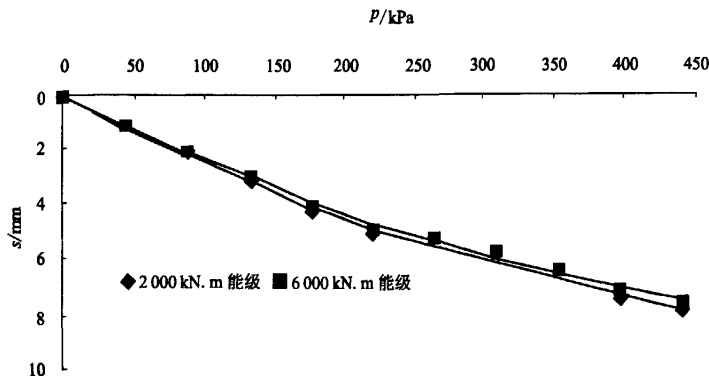


图 1 静载试验  $p-s$  曲线

从图 1 的  $p-s$  曲线形态特征可以看出:施加第  $1、2$  级荷载时地基土的沉降速率较大,主要是因为荷载板下砂土找平产生一定的附加沉降以及由于加荷初期表层回填碎石土较为松散而产生较大的瞬时沉降,而后沉降速率降低。

图 1 中的  $p-s$  曲线均未出现明显的拐点,因此无法根据拐点法确定试验的比例界限压力和极限压力。当  $s/d=0.01$  时,  $s=13.65\text{ mm}$ ,而当荷载为  $440\text{ kPa}$  时,  $2000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯区和  $6000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级强夯区的总沉降量仅分别为  $8.610\text{ mm}$  和  $8.290\text{ mm}$ ,因此可以认

为该点的地基承载力特征值大于设计所要求的 220 kPa,其变形模量分别为 38.7 MPa 和 40.5 MPa。

#### 4.2 瑞利波测试

瑞利波测试的主要目的是根据所测得的各分层波速值来评价夯后填土的整体均匀性及强夯的有效加固深度等。

为了与夯后地基处理效果作对比,采用瑞利波在区内进行了夯前试验,试验结果表明,在 2000 kN·m 能级强夯区,第①层碎石填土的剪切波速值  $v_s$  范围为 132.5~178.8 m/s,平均为 158.8 m/s;第⑦<sub>1</sub>层强风化花岗岩的剪切波速值  $v_s$  范围为 355.5~777.5 m/s,平均为 519.3 m/s。在 6000 kN·m 能级强夯区,第①层碎石填土的剪切波速值  $v_s$  范围为 123.8~165.0 m/s,平均为 136.9 m/s;第②层淤泥质粉质粘土层的剪切波速值  $v_s$  范围为 100.0~111.2 m/s,平均为 106.5 m/s;第⑦<sub>1</sub>层强风化花岗岩的剪切波速值  $v_s$  范围为 502.5~689.8 m/s,平均为 552.6 m/s。

为了检测夯后回填土的整体均匀性、强夯的有效加固深度等,进行了全覆盖性的瑞利波检测试验,在场区 2000 kN·m 能级强夯区和 6000 kN·m 能级强夯区分别安排了 6 条和 7 条测线进行检测,检测结果见图 2 和图 3。

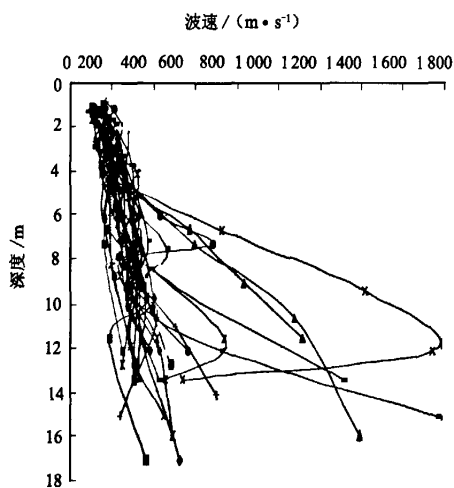


图 2 剪切波速-深度关系曲线图  
(2000 kN·m 能级强夯区)

根据图 2 和图 3,再结合夯前试验结果,在 2000 kN·m 能级强夯区,强夯后该区回填碎石土的剪切波速明显提高,尤其在上部 0~6 m 深度范围内,剪切波速提高将近 2 倍,由此说明,强夯后回填土的密实度明显提高,强夯的有效加固深度达 6.0 m。

在 6000 kN·m 能级强夯区,强夯后回填碎石

土的密实度明显提高,0~5.0 m 深度范围内碎石土的整体均匀性很好,而 5~11.0 m 深度范围内碎石土的整体均匀性较上部稍差,强夯有效加固深度为 9.8~11.6 m,在个别测线某一深度下(10.7 m 和 11.6 m)局部存在低速带,说明该部位存在淤泥质土或全风化基岩,而其它部位挤淤良好。

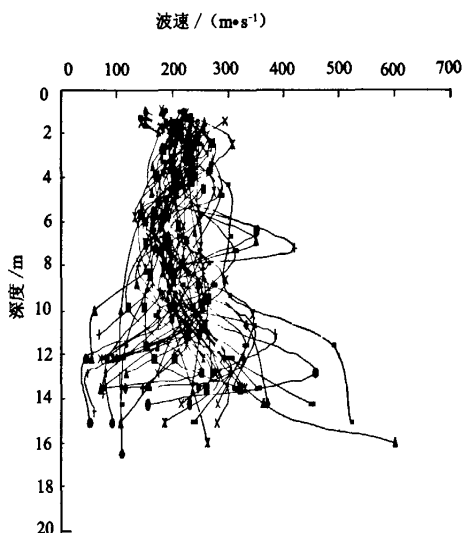


图 3 剪切波速-深度关系曲线图  
(6000 kN·m 能级强夯区)

#### 4.3 动力触探测试

动力触探测试的目的是为了测试回填碎石土的密实度,并与夯前测试资料对比来评价强夯的有效加固深度和加固效果。

根据夯后动力触探测试结果(见表 1 和表 2),在 2000 kN·m 能级强夯区,边界 1 号动力触探测试点由于位于夯区边界,为单侧夯点影响区,碎石土仍然呈松散状态,地基承载力提高较少,而另两个测试点的测试结果表明强夯后的碎石土已达到稍密—中密状态且以中密状态为主,承载力提高较大,整体密实程度较为均匀,夯区地基承载力特征值达到 270~480 kPa,变形模量达到 20~32 MPa,强夯影响深度可达 5.50 m。在 6000 kN·m 能级强夯区,强夯后的碎石土已达到稍密—密实状态且以中密—密实状态为主,整体上承载力提高较大,密实程度较为均匀,5.0 m 以上地基承载力特征值达 400~500 kPa,变形模量达 28.0~42.2 MPa,5.0 m 以下碎石土的整体均匀性较上部稍差,以稍密—中密状态为主,可能是回填碎石土的级配差和大块石存在的缘故,地基承载力特征值达到 210~250 kPa,变形模量达到 17.2~18.4 MPa,强夯影响深度可达到 11.0 m。

表1 2000 kN·m能级强夯区动力触探汇总表

检测点号	力学分层深度/m	力学分层厚度/m	修正后统计平均击数	密实度评价	地基承载力特征值/kPa	变形模量/MPa	备注
边界上1号点	0~3.4	3.4	2.9	松散	230.0	14.0	超重型
	0~1.8	1.8	8.4	稍密	270.0	20.0	重型
	1.8~3.2	1.4	13.2	中密	400.0	27.8	重型
	3.2~5.0	1.8	17.4	中密	480.0	31.0	重型
DT1	0~1.7	1.7	15.4	中密	460.0	31.3	重型
	1.7~3.6	1.9	12.3	中密	360.0	25.8	重型
	3.6~6.0	2.4	15.6	中密	480.0	32.0	重型

表2 6000 kN·m能级强夯区动力触探汇总表

检测点号	力学分层深度/m	力学分层厚度/m	修正后统计平均击数	密实度	地基承载力特征值/kPa	变形模量/MPa	备注
夯点间4号点	0.0~0.7	0.7	18.0	中密	480.0	31.0	重型
	0.7~2.0	1.3	55.5	密实	580.0	42.2	重型
	2.0~3.0	1.0	18.7	中密	480.0	31.0	重型
DT3	0.0~2.0	2.0	12.0	密实	580.0	42.2	超重型
	2.0~6.4	4.4	7.9	中密	400.0	28.0	超重型
	6.4~10.3	3.9	5.0	稍密	210.0	17.2	超重型
DT4	0.0~8.8	8.8	9.8	中密	470.0	29.2	超重型
	8.8~9.7	0.9	5.6	稍密	230.0	17.8	超重型
	9.7~11.0	1.3	9.1	中密	420.0	28.5	超重型
DT5	0.0~7.1	7.1	8.9	中密	420.0	29.6	超重型
	7.1~11.6	4.5	5.7	稍密	250.0	18.4	超重型

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

通过采用载荷板试验、瑞利波测试及动力触探试验等原位测试及物探手段对强夯后的回填土地基进行检测,证明强夯法是加固开山碎石填海地基的一种行之有效的方法。2000 kN·m能级的有效加固深度可达5.5m,而6000 kN·m能级的有效加固深度可达11m,地基土的整体均匀性均较好,加固后的地基承载力及变形均满足设计要求。

### 5.2 展望

虽然加固后的地基土在承载力、变形及均匀性方面等均满足设计要求,但通过试验,我们亦可发现一些不尽人意处,如在6000 kN·m能级强夯区,可能受碎石级配差的影响,在5~11m段的均匀性较上部有所变差,在某些深度下,局部存在有低速带,这样的情况对一些变形要求很严格的工程来说是不利的,因此在强夯法施工过程中应采用信息化施工

方法,以保证施工后场地的均匀性及用于指导设计。虽然根据我国的国情和强夯施工的现状,要做到在施工过程中对夯击效果进行检测,并利用计算机进行信息处理,目前推广存在有一定的难度,但仍应成为我们为之努力的目标。

### 参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建材工业出版社,2002.
- [3] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [4] 王 珊. 地基处理新技术及其工程实例实用手册[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社,2002.

收稿日期:2008-12-30